

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.05.01

引用格式: 王登红,刘善宝,王成辉,等.我国三稀矿产找矿进展述评与新一轮找矿建议[J].中国地质调查,2023,10(5):1-8. (Wang D H, Liu S B, Wang C H, et al. Review on the progress of prospecting for three types of rare mineral resources in China and suggestions for the new round of prospecting[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(5): 1-8.)

我国三稀矿产找矿进展述评与新一轮找矿建议

王登红, 刘善宝, 王成辉, 于扬, 赵芝, 代鸿章

(自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 三稀矿产资源包括稀土、稀有和稀散矿产资源, 其安全供应关系到我国战略性新兴产业的发展壮大。近年来, 我国在三稀矿产找矿方面取得了一系列新进展: 以项目组2023年取得的找矿进展为例, 在四川省冕宁牦牛坪超大型稀土矿床外围发现了品位高、厚度大的氟碳铈矿-萤石-重晶石-方解石矿脉; 在四川省加达大型锂矿床外围钻获含锂辉石伟晶岩矿体。这些找矿新发现将为我国战略性新兴产业的发展提供资源保障。但是, 我国关键的稀有金属如锂、铌、钽还需依赖进口。目前, 我国在三稀矿产资源调查研究领域还存在很多理论难题(如关键典型矿床的成因、三稀矿产空间分布规律等), 相关技术领域还存在诸多瓶颈(如探测技术、共生伴生资源采选冶技术等)。为了进一步提高三稀矿产资源的综合开发利用, 并在新一轮找矿突破战略行动中取得成效, 建议加强三稀矿产赋存状态、工业类型与成因类型以及成矿模式与勘查模型的综合研究。

关键词: 三稀矿产; 找矿进展; 找矿建议; 新一轮找矿突破战略行动

中图分类号: P618.6; P618.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2023)05-0001-08

0 引言

自2010年我国启动三稀(稀有、稀土、稀散金属)矿产地质调查以来, 通过十多年的努力, 在三稀矿产找矿方面取得了一系列进展^[1-5], 有效地改变了我国三稀金属资源格局, 尤其是硬岩型锂矿的资源格局。但整体而言, 我国三稀矿产资源紧张的局面尚未改变, 尤其是随着以新能源汽车为代表的战略性新兴产业的快速发展, 原有探明资源消耗快速, 自我保障能力严重不足^[6]。因此, 必须高度重视三稀矿产在社会发展中的作用, 尤其是要确保我国战略性新兴产业产业链的安全, 这对于保障国家能源资源的安全具有重要意义。本文重点梳理了我国三稀矿产资源现状、找矿方

向及近年取得的找矿进展, 并为新一轮找矿突破战略行动中三稀矿产找矿工作提出建议。

1 三稀矿产找矿进展概述

三稀矿产包括8种稀有金属(锂、铷、铯、铍、锆、钨、铌、钽)、17种稀土金属(镧系元素和钪、钇)和8种稀散金属(镓、锗、铊、铟、铊、铊、铊、铊)矿产, 是战略性新兴产业矿产或关键金属矿产的重要组成部分, 也是近年来国际上对矿产资源战略角逐的新焦点^[6-8]。2016年以前的关于三稀矿产的找矿成果和进展已有过文献介绍^[1], 近年来又不断取得新成果、新进展、新认识^[2,4,9-16], 这些成就有效地改变了我国三稀矿产的资源格局, 为战略性新兴产业的发展提供了资源保障。

收稿日期: 2023-09-25; 修订日期: 2023-10-07。

基金项目: 中国地质调查局“战略新兴产业矿产地质调查工程(编号: DD20230034)”“四川康定—云南个旧稀有稀土矿产地质调查(编号: DD20230290)”“中国矿产地质志续编与产品服务(编号: DD20221695)”和中稀(凉山)稀土有限公司“四川省牦牛坪、大陆槽稀土矿成矿规律与找矿预测(编号: LSXT2023001)”项目联合资助。

第一作者简介: 王登红(1967—), 男, 二级研究员, 博士生导师, 中国地质调查局“战略新兴产业矿产调查工程”首席专家, 主要从事矿产资源研究工作。Email: wangdenghong@vip.sina.com。

通信作者简介: 赵芝(1984—), 副研究员, 主要从事稀土成矿规律研究工作。Email: zhaozhi_sun@163.com。

在稀土金属资源方面,离子吸附型稀土矿不断有新发现^[11],但硬岩型找矿成果更为显著。2019—2021 年,中国地质科学院矿产资源研究所李以科等^[12]提出了白云鄂博矿床属于与碳酸岩岩浆作用有关的岩浆型 + 高温热液交代型(霓长岩型)矿床的新认识,并通过专题地质填图 - 反射地震 - 重力 - 磁法 - 电法综合勘查技术方法示范,与包头钢铁(集团)有限责任公司一起通过 48 个钻孔的钻探验证,新探获含稀土的 2.8 亿 t 铁矿石;2019—2023 年,中国地质科学院矿产资源研究所在四川省德昌大陆槽和冕宁牦牛坪外围开展了找矿工作,尤

其是 2023 年在牦牛坪外围龙家沟一带施工的 ZK001 钻孔,钻探深度为 350 m,按照稀土氧化物(rare earth oxides, REO)边界品位 1%、工业品位 2%、夹石剔除厚度 2 m 的标准圈定工业矿体 3 层,总视厚度为 125.76 m,平均品位 4.87%。其中:第一层矿体见矿深度 63.53 ~ 120.95 m,视厚度 49.42 m, REO 4.42%;第二层矿体见矿深度 167.80 ~ 237.30 m,视厚度 69.50 m, REO 5.33%;第三层矿体见矿深度 261.74 ~ 268.58 m,视厚度 6.84 m, REO 3.51%。此外,还有矿化体 9 层,总视厚度 27.05 m,平均品位 1.32% (图 1)。



图 1 四川省冕宁龙家沟 ZK001 钻孔揭露的含氟碳铈矿 - 萤石 - 重晶石 - 方解石矿石照片 (2023 年 8 月)
Fig. 1 Photographs of bastnaesite - fluorite - barite - calcite ores in drilling bore ZK001 in Longjiagou of Mianning in Sichuan Province (August, 2023)

在稀有金属资源方面,在青藏高原周边的西昆仑、阿尔金、松潘—甘孜、西南三江及青藏高原腹地的喜马拉雅成矿带以及江西幕阜山地区均取得了找矿新发现、新进展^[13-16],有效地改变了我国稀有金属资源格局,尤其是硬岩型锂矿的资源格局^[10]。西昆仑大红柳滩及其所在矿集区的氧化锂探明资源量已经达到百万吨以上^[15],阿尔金成矿带虽然尚未探明资源量(工作正在进行),但潜力巨大;松潘—甘孜成矿带除了甲基卡矿田有新增资源储量之外,在可尔因矿集区又发现了加达等大型硬岩型锂矿^[4],2023 年 9 月又在其外围钻探发现新的矿体(图 2);据李文昌 2023 年 9 月 20 日介绍,西南三江的云南麻花坪钨铍矿取得了重大找矿突破,矿体中 WO_3 品位 0.25% ~ 0.59%, BeO 品位 0.16% ~ 0.41%, CaF_2 品位 11.31% ~ 18.17%,估算远景资源量 WO_3 超过 100 万 t, BeO 超过 50 万 t,萤石超过 2 000 万 t。此外,在江苏溧水盆地新发现热液充填型锆矿,规模为中型^[17]。

在稀散金属资源方面,我国商务部和海关总署 2023 年 7 月 3 日发布了镓锗相关物项实施出口



图 2 四川省马尔康马纳一带新发现的含锂辉石伟晶岩 (2023 年 9 月,白色岩心主体为含锂辉石伟晶岩)
Fig. 2 Newly discovered spodumene pegmatite in Mana of Maerkang in Sichuan Province (September, 2023, the white core is mainly composed of spodumene pegmatite)

管制的公告,引起了稀散金属的高度关注。由于稀散金属主要呈伴生矿产出,一般不单独立项,而是通过综合评价来查明其赋存状态、可利用性及其

资源潜力。其中,镓主要从铝土矿冶金过程中综合回收,锗主要从闪锌矿等有色金属矿产中综合回收,其他稀散金属(镉、碲、硒、铼、铟、铊)从岩浆成因的铜镍硫化物矿床、斑岩铜钼矿、块状硫化物型铅锌矿等不同类型的矿床中回收。在找矿方面也有新发现,如在四川盆地中发现砂岩型铀矿化等^[18]。

2 与三稀矿产找矿有关问题的述评

2006—2013年,由原国土资源部组织实施了对铁、铜、稀土、萤石等35种重要矿产的全国性潜力评价工作,圈定了找矿远景区和靶区,为新一轮找矿突破战略行动的实施奠定了基础。但是,对绝大部分三稀矿产没有开展潜力评价工作,如在8种稀有金属中只对锂作了潜力评价,而且只是对已知矿区的深边部开展“就矿找矿”式的评价,尚未涵盖2013年以来新发现的锂矿区,包括西昆仑的大红柳滩锂矿带和阿尔金的锂成矿带。此外,2006—2013年的全国重要矿产潜力评价工作,并没有从战略性新兴产业发展的角度开展,对于矿产资源尤其是关键矿产在高科技领域的新用途,几乎没有评价,包括锂在新能源汽车领域、稀散元素在光伏领域、稀土在高端装备制造业领域,等等。这就脱离了当前国家强调的“高质量发展”的新要求,也未能满足“保障全产业链安全”的新要求。因此,有必要从新的角度对三稀矿产资源的潜力重新进行评价,以为国家提供决策依据。

2.1 我国三稀矿产资源现状

(1)三稀资源分布不均衡,优势矿种只有稀土和部分稀散金属矿产。主要的、关键的稀有金属(如锂、铌、钽)高度依赖进口,有的尚不能正常进口,还不时会“被卡脖子”,难以保障战略性新兴产业的快速发展,甚至可能影响到国家安全。比如,2022年11月2日,加拿大政府以“国家安全”为由,命令中矿资源、藏格矿业及盛新锂能等中国上市公司撤出对加拿大关键矿产的投资。

(2)好矿少、品位低、难选冶,缺乏国际竞争力(如铌和钽)。近年来在贵州务正道大竹园、云南玉溪小石桥、昆明安宁草铺等地的与铝土矿有关的“黏土型”或“沉积型”锂矿^[19-20],尚未解决开发利用所涉及的经济技术和环保问题。

(3)以共生伴生矿为主,独立矿床少,需要加强采选冶技术的研发。如我国的铍矿要么属于新疆

可可托海这样的复杂类型,要么伴生在钨矿中,而其中的伴生铍在开采过程中也没有被充分利用(如江西画眉坳、湖南柿竹园、内蒙古黄岗梁、新疆白杨河);再如四川雪宝顶这样的类型,虽然矿床质量好但因位于高海拔或保护区而无法开采。

(4)探明程度低,典型矿床的深部均未封闭。主要包括最著名的内蒙古白云鄂博、四川的攀枝花、云南的个旧、新疆的可可托海,其成矿物质从何而来等基础问题一直未解决,从而制约了找矿方向的确定和勘查技术手段的选择。

(5)探测技术手段有限。主要是以“边采边探”增加资源量,如广西大厂,仅通过采矿证实100号矿体与105号矿体连为一体,而对是否有新的类似的“岩溶充填”特富矿体^[21],目前的技术手段难以探测。

(6)典型矿床成因机制不明,尤其是较为著名的一些矿床,如云南会泽等稀有稀散金属矿床,以往认为是层控矿床,现在发现延深1 km成矿仍然很好。

2.2 我国三稀矿产资源找矿方向

新类型三稀矿产资源的调查研究,不但有助于弥补传统资源之不足,还可以带动理论的创新。如铝土矿中高含量钨和锂的发现^[19],不但可以提升铝土矿的资源价值,也对如何利用好此类沉积型或者其他非传统三稀矿产提出了新的科技命题。近年来,国内外对于卤水、油田水及砂岩中赋存的锂等稀有金属的开发利用价值给予了高度关注,我国柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水中的Li含量最高达983 mg/L,一般也有几十mg/L^[22],而四川盆地多个层位的绿豆岩有可能为深部卤水中Li的富集提供成矿物质来源。塔里木盆地、准噶尔盆地乃至中东部地区的江汉盆地、南阳盆地等也值得探索。

成矿机制的实验研究大有作为,尤其是地壳中高度分散的三稀金属是如何高度聚集成矿的,包括内蒙古的白云鄂博、湖南的柿竹园、广西的大厂、云南的金顶、甘肃的金川等世界著名的矿床。典型矿床的精细结构(或称“透明化”)与精准探测技术(层脉识别技术)研究,如“五层楼+地下室”勘查模型的建立,不但适合于华南地区的石英脉型钨矿区,也适合于川西甲基卡、可尔因等大型锂矿资源基地,不但为深部找矿提供了理论依据,也为人工地震等深部地球物理探测技术手段的使用指明了方向。对不同类型三稀矿产空间分布规律的总结,

比如,为什么国外的硬岩型锂矿集中分布在地台区,而中国的硬岩型锂矿却分布在造山带;查明锂等稀有金属的立体分带机制和离子吸附型稀土矿的垂向富集机制;查明重点矿集区(或者大型资源基地)不同层次的深部结构,为深部找矿提供技术支持。

发展矿床成矿系列理论,建立“全位成矿+缺位找矿”的模型。将不同类型、不同矿种的战略性矿产综合起来,通过系统化研究,互为找矿标志,举一反三,开拓思路,实现理论创新引领找矿突破。比如,湖北和湖南境内幕阜山一带的稀有金属矿产,与江西境内的九岭和武功山地区的稀有金属成矿特点相似,构成同一个矿集区,但不同地段的成矿条件不同,找矿方向也不一样。其中,仁里大型层状钽矿的发现对江西和湖北的找矿是有启发意义的,而江西九岭含磷锂铝石浅色花岗岩型稀有金属矿床的发现,也对湖北和湖南有指导作用。在江西九岭同安等地的浅色花岗岩中,磷锂铝石的含量可达4%~5%,实际上已经是造岩矿物了,同时还含有绿柱石、锡石、铌钽矿物等有用金属矿物,其岩体的岩相分带性也与宜春414矿床有一定的相似性。2017年,对7个区块进行了系统采样;2018年,估算 Li_2O 资源量达38.26万 $\text{t}^{[23]}$ 。更有意义的是,此类岩体型稀有金属矿床,类似于铜矿中的“斑岩铜矿”,虽然品位不是很高但规模很大,具有“低品位大吨位”的特点,对改变锂矿资源格局具有潜在的且十分重要的意义。

3 对新一轮找矿的建议

3.1 加强工业类型与成因类型的综合研究,对于找矿突破具有现实意义

工业类型是采矿工业界所特别关心的,而成因类型往往是学术界所最关心的。近年来,学术界对锂矿的类型高度关注,提出了“黏土型”“热水型”“隐爆角砾岩型”等新类型,但工业界更多关心的是高品质的优质资源,而优质锂资源仍然以卤水型和伟晶岩型最为重要。尽管云南、贵州、四川、湖北、陕西乃至青海等省对“黏土型”锂矿找矿投入了大量工作,取得了一系列的新发现,新增的“潜在资源量”超过千万吨(Li_2O),有的地区地方政府还设立了开发区、高新区、产业园区等,加大投入,招商引资。但对于锂行业来说,锂矿的探矿证、采矿证

都需要经过严格的审批才能获得,而“黏土型”锂矿的开发要通过“环保部门”的审批环节,恐怕并非易事。因此,对于“潜在资源量”天文数字一般的“黏土型”等新类型锂资源,要想真正实现符合环保要求、经济可行的开采,尤其是在锂矿价格下行的大前提下,还有很长的路要走。

另外,“黏土型”锂矿分布在盆地地区,野外找矿难度相对较小,而伟晶岩型的锂矿主要分布在高海拔、深切割,资料很少的造山带空白区,找矿工作难度极大,以至于投入严重不足,优质资源(高品位的伟晶岩型锂矿石)一旦被发现,随即就会被人“挖掉”。这种现象无论是西部交通不便的西昆仑、阿尔金地区还是东部湘鄂赣交界的幕阜山地区,莫不如是。至于江西九岭式的云英岩型或细粒花岗岩型锂矿^[23],曾经在价格高位时引发了“全民挑着箩筐挖锂云母”,但在锂价趋于理性而环保要求不降低的情况下,其开发利用的可行性需要重新评价。云英岩型、角砾岩筒型、细粒花岗岩型(或淡色花岗岩型)等新类型,也引起了普遍关注,但由于选冶特征及资源禀赋特征普遍不如伟晶岩型,其经济效益和环保效益一般也不如伟晶岩型。在赣南的石英脉型钨矿分布区,普遍存在云英岩型锂矿,如石雷钨矿^[24],但往往呈“鸡窝状”,工业价值不大。实际上,在赣南钨矿“五层楼”模式中的第一层楼——云母线中就常见锂云母,但只是钨矿的找矿标志,本身不具备大规模开采的工业价值。这充分说明,工业界对于伟晶岩型锂矿石的需求远远大于“黏土型”锂资源,因此,加强对伟晶岩型锂矿的寻找仍然是新一轮锂矿找矿突破战略行动中的首要任务。“黏土型”“角砾岩筒型”“云英岩型”“淡色花岗岩型”等其他硬岩型锂矿是否具有开发利用价值,不能仅看其锂含量是否达到“边界品位”和其资源量的大小,更要衡量其开采是否符合技术经济条件及环境保护的要求。

3.2 加强三稀元素赋存状态的综合研究,对于开发利用具有重要的指导意义

三稀矿产赋存状态研究是一重要内容,特别是对像白云鄂博、801这样的超大型矿床,其稀土铌、钽、锆等资源的有效利用研究应提到重要的议事日程上。近年来,虽然已发现了一批三稀矿产资源或者战略性新兴产业矿产资源,但通过对这些成果进行再评估,不难发现,绝大部分项目没有进行元素或矿物质赋存状态的研究,只是片面强调元素的含

量,认为含量达到“边界品位”或者“工业品位”就圈定矿体,进而估算“资源量”或者“资源储量”。这方面的例子层出不穷,如:广西某地将含Ga的地层当作矿层;甘肃某地将含Nb的火山岩当成矿石;广东某地将含Rb的伴生矿的评价指标当作独立矿的评价指标,等等。之所以出现这些问题,是因为只看“含量”不看“可利用性”,更不看“经济性”。比如,近期在贵州发现的被认为属于“新类型”的稀土矿床,据称储量达44万t。所谓的“储量”是指在当前的技术条件及环保要求下能被经济开采的可利用资源,而不是开采之后“亏本”的、或者仅仅是实验室能回收的资源。其实,在评价三稀矿产资源时,首先要确定矿石类型(矿石是可经济开采的)而不只是某个元素的含量,更不能把岩石类型当作矿石类型甚至矿床类型。比如:世界各地与地幔柱或者热点有关的火山岩、侵入岩中往往富含不相容高场强稀有金属元素^[25],属于普遍现象但不是成矿作用的结果;在山西、贵州、河南的铝土矿分布区,顶底板、夹矸或某些特殊岩石类型中Li含量很高,也是一个普遍现象;四川盆地及其周边地区出现的“绿豆岩”含锂较高^[26],仍然是一个普遍现象。需要强调的还有,凡是赋存在绿泥石中的锂,在目前的技术经济条件下尚不具开发利用的现实意义^[27]。因此,加强锂等三稀矿产的元素赋存状态的研究至关重要。

3.3 加强成矿模式与勘查模型的综合研究,对于找矿突破具有战略意义

对稀土的找矿,目前还应以硬岩型矿产为主。内蒙古的白云鄂博、四川的牦牛坪和山东的郯山是我国最重要的三大硬岩型稀土矿床,工作程度很高,采矿工作也进入攻坚克难阶段。白云鄂博和牦牛坪早晚要转入坑采,而山东微山县的郯山稀土矿本身就是全世界唯一地下开采的独立稀土矿床,其采矿技术将对今后稀土矿井下开采产生示范作用。如何保持我国稀土在全球的绝对领先地位,既要开拓新地域寻找新矿床,也要就矿找矿,尤其是郯山式深部矿体的地下开采,将为白云鄂博和牦牛坪稀土矿的深部开采提供借鉴。但深部开采需要高品质的矿石资源保障,否则没有经济效益,资源量再大的隐伏稀土矿也难以开采(深部开采成本高,技术难度大,安全隐患更多)。

四川牦牛坪作为全球第三大稀土矿床(仅次于我国白云鄂博和美国芒廷帕斯)近期又取得了找矿

新突破,尤其是在龙家沟一带第四系(厚达50m以上)之下探获了隐伏的厚大富稀土矿体。其中,新发现的高品位氟碳铈矿-萤石-重晶石-方解石脉型稀土矿石^[28]经多晶X射线衍射分析,主要由方解石(40%~75%)、萤石(25%~58%)、重晶石(5%~25%)和氟碳铈矿(1%~16%)组成。龙家沟与山东郯山的稀土矿石类型具有类似性。此外,根据龙家沟稀土矿石的结构、构造及矿物组成,可分为早、晚两个阶段,早阶段矿石主要呈中粗粒结构,块状构造、斑杂状构造,晚阶段矿石呈中细粒角砾状构造、流动状构造,二者叠加之后构成了富含稀土的厚大矿体。这一特点在山东郯山也有体现。此类高品位、易采选矿石新类型及新矿体的发现,是新一轮找矿突破战略行动以来,在稀土矿产方面的新突破。因此,四川省牦牛坪矿床与山东省郯山矿床在成矿机制上具有相似性,主要受到陆内深大断裂带控制,牦牛坪受哈哈断裂带的控制,而郯山受郯庐断裂带次级断裂的控制,二者可以互为找矿依据,即成因模式不同,但深部找矿的勘查模型可以互相借鉴。

牦牛坪和郯山沿深大断裂找矿的勘查模型是否适用于白云鄂博,是值得研究的。牦牛坪稀土矿床形成于新生代,郯山形成于中生代,而白云鄂博一般认为形成于中元古代-新元古代。前二者属于单一成矿期成矿,相对简单,而白云鄂博有可能经历了多期次成矿,不排除加里东期、海西期乃至印支期成矿的可能性。也就是说,在白云鄂博一带寻找受到区域性断裂带控制的新矿体也是完全可能的。此外,无论是牦牛坪、郯山还是白云鄂博,都拥有丰富的萤石资源,尤其是白云鄂博的萤石资源不但规模巨大(可能是中国最大的伴生萤石矿),而且可以圈定出独立的萤石矿体。这对于在牦牛坪和郯山一带寻找独立的萤石矿体,也具有重要的借鉴意义。

4 结语

三稀矿产是战略性关键矿产的重要组成部分,而战略性关键矿产是人类社会发展到关键阶段、在关键场合发挥关键性作用的具有战略性意义的矿产资源。我国目前仍然属于发展中国家,需要大量的包括稀有、稀土和稀散金属在内的矿产资源作为经济社会发展的重要物质基础。虽然近年来在四

川甲基卡、新疆大红柳滩、四川牦牛坪、云南麻花坪等地取得了新的找矿突破,但要保障国家对于三稀矿产的需求还任重道远。因此,迫切需要进一步加强科技攻关和创新引领,尤其是在白云鄂博、牦牛坪、大陆槽、甲基卡、大红柳滩等已知矿区的深边部开展以形成大型资源基地为目标的找矿工作,力争增储上产;同时带动华北地台北缘、大兴安岭、南岭、西昆仑、阿尔金、松潘—甘孜、西南三江、喜马拉雅、长江中下游等重要成矿区带的找矿突破。与此同时,加强采选冶综合利用方面的创新研究,主攻优势类型,兼顾一般类型,查明三稀元素或矿物的赋存状态,为高效、绿色利用三稀资源,促进高质量矿业开发提供资源和技术保障。

参考文献(References):

- [1] 王登红,王瑞江,孙艳,等.我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J].地球学报,2016,37(5):569–580.
Wang D H, Wang R J, Sun Y, et al. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(5): 569–580.
- [2] 王登红,郑绵平,王成辉,等.大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查工程进展与主要成果[J].中国地质调查,2019,6(6):1–11.
Wang D H, Zheng M P, Wang C H, et al. Progresses and main achievements on bulk lacking minerals and strategic emerging industry minerals survey project[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(6): 1–11.
- [3] 毛景文,袁顺达,谢桂青,等.21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J].矿床地质,2019,38(5):935–969.
Mao J W, Yuan S D, Xie G Q, et al. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(5): 935–969.
- [4] 王成辉,王登红,刘善宝,等.战略新兴矿产调查工程进展与主要成果[J].中国地质调查,2022,9(5):1–14.
Wang C H, Wang D H, Liu S B, et al. Progresses and main achievements on strategic emerging minerals survey project[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(5): 1–14.
- [5] 杨岳清,王登红,孙艳,等.矿产资源研究所“三稀”矿产研究与找矿实践70年历程——回顾与启示[J].矿床地质,2021,40(4):655–692.
Yang Y Q, Wang D H, Sun Y, et al. Review on research and exploration of the 3R mineral resources during the past 70 years by institute of mineral resources[J]. Mineral Deposits, 2021, 40(4): 655–692.
- [6] 王登红.关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J].地质学报,2019,93(6):1189–1209.
Wang D H. Study on critical mineral resources: Significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1189–1209.
- [7] 王瑞江,王登红,李建康,等.稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用[M].北京:地质出版社,2015:1–429.
Wang R J, Wang D H, Li J L, et al. The Exploitation and Utilization of Rare – Metals, Rare – Earth and Rare – Scattered Metals Mineral Resources [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015: 1–429.
- [8] 代鸿章,王登红,刘善宝,等.国外锂矿找矿新进展(2019–2021年)及对我国战略性矿产勘查的启示[J].地质学报,2023,97(2):583–595.
Dai H Z, Wang D H, Liu S B, et al. New progress in lithium prospecting abroad (2019–2021) and its significance to China's strategic mining resources exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(2): 583–595.
- [9] 王登红,孙艳,刘喜方,等.锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向[J].中国地质调查,2018,5(1):1–9.
Wang D H, Sun Y, Liu X F, et al. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal [J]. Geological Survey of China, 2018, 5(1): 1–9.
- [10] 王登红,王成辉,孙艳,等.我国锂铍钽矿床调查研究进展及相关问题简述[J].中国地质调查,2017,4(5):1–8.
Wang D H, Wang C H, Sun Y, et al. New progresses and discussion on the survey and research of Li, Be, Ta ore deposits in China [J]. Geological Survey of China, 2017, 4(5): 1–8.
- [11] 赵芝,王登红,王成辉,等.离子吸附型稀土找矿及研究新进展[J].地质学报,2019,93(6):1454–1465.
Zhao Z, Wang D H, Wang C H, et al. Progress in prospecting and research of ion-adsorption type REE deposits [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1454–1465.
- [12] 李以科,柯昌辉,王登红,等.白云鄂博矿区深边部铁矿床勘查突破及启示[J].矿床地质,2022,41(1):202–206.
Li Y K, Ke C H, Wang D H, et al. Important progress in prospecting and exploration of iron ore in deep border area of Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China [J]. Mineral Deposits, 2022, 41(1): 202–206.
- [13] 李光明,张林奎,张志,等.青藏高原南部的主要战略性矿产:勘查进展、资源潜力与找矿方向[J].沉积与特提斯地质,2021,41(2):351–360.
Li G M, Zhang L K, Zhang Z, et al. New exploration progresses, resource potentials and prospecting targets of strategic minerals in the southern Qinghai – Tibet Plateau [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2021, 41(2): 351–360.
- [14] 张志,李光明,张林奎.西藏喜马拉雅带稀有金属矿勘查与研究进展[J].沉积与特提斯地质,2022,42(2):176–188.
Zhang Z, Li G M, Zhang L K. Exploration and research progresses of rare metals in Himalayan belt, Tibet [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(2): 176–188.
- [15] 涂其军,韩琼,李平,等.西昆仑大红柳滩一带锂辉石矿基本特征和勘查新进展[J].地质学报,2019,93(11):2862–2873.
Tu Q J, Han Q, Li P, et al. Basic characteristics and exploration progress of the spodumene ore deposit in the Dahongliutan area,

- West Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(11): 2862 – 2873.
- [16] 周芳春, 陈虎, 李鹏, 等. 幕阜山地区稀有金属矿勘查工作进展及成矿预测[J]. *中国地质调查*, 2022, 9(3): 32 – 39.
- Zhou F C, Chen H, Li P, et al. Exploration progress and metallogenetic prediction of rare metal deposits in Mufushan area[J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(3): 32 – 39.
- [17] 陈冬, 李鑫, 缪柏虎, 等. 江苏溧水卧龙山锶矿床地质特征及找矿方向[J]. *矿床地质*, 2016, 35(4): 709 – 723.
- Chen D, Li X, Miao B H, et al. Geological characteristics and prospecting direction of Wolongshan strontium deposit in Lishui area, Jiangsu Province[J]. *Mineral Deposits*, 2016, 35(4): 709 – 723.
- [18] 郝雪峰, 唐屹, 彭宇, 等. 四川盆地西南部乐山地区砂岩型铊钼矿地质特征及超常富集成矿[J]. *地质与勘探*, 2023, 59(4): 734 – 746.
- Hao X F, Tang Y, Peng Y, et al. Geological characteristics of sandstone – type rhenium – molybdenum deposits and super – enrichment mineralization in the Leshan area, southwestern Sichuan Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(4): 734 – 746.
- [19] Wang D H, Li P G, Qu W J, et al. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(1): 145 – 152.
- [20] 于泐, 王登红, 于扬, 等. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状[J]. *岩矿测试*, 2019, 38(3): 354 – 364.
- Yu F, Wang D H, Yu Y, et al. The distribution and exploration status of domestic and foreign sedimentary – type Lithium deposits[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(3): 354 – 364.
- [21] Wang D H, Chen Y C, Chen W, et al. Dating of the Dachang superlarge tin – polymetallic deposit in Guangxi and its implication for the genesis of the No. 100 orebody[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 452 – 458.
- [22] 谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 等. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水水资源水化学特征及化学演化[J]. *古地理学报*, 2007, 9(3): 313 – 320.
- Tan H B, Cao C D, Li Y W, et al. Hydrochemistry characteristics and chemical evolution of oilfield brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 313 – 320.
- [23] 王成辉, 王登红, 陈晨, 等. 九岭式狮子岭岩体型稀有金属成矿作用研究进展及其找矿意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1359 – 1373.
- Wang C H, Wang D H, Chen C, et al. Progress of research on the Shiziling rare metals mineralization from Jiuling – type rock and its significance for prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1359 – 1373.
- [24] 王成辉, 王登红, 刘善宝, 等. 赣南石雷钨锡矿云英岩型锂矿找矿新发现及其区域成矿潜力分析[J]. *中国地质*, 2022, 49(6): 1834 – 1844.
- Wang C H, Wang D H, Liu S B, et al. New discovery and regional prospecting potentiality of greisen – type lithium mineralization in the Shilei tungsten and tin deposit, Southern Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 2022, 49(6): 1834 – 1844.
- [25] 王登红. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京: 地震出版社, 1998: 1 – 160.
- Wang D H. Mantle Plume and Mineralization[M]. Beijing: Seismological Press, 1998: 1 – 160.
- [26] 孙艳, 高允, 王登红, 等. 重庆铜梁地区“绿豆岩”中碎屑锆石 U – Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(6): 668 – 677.
- Sun Y, Gao Y, Wang D H, et al. Zircon U – Pb dating of “Mung Bean Rock” in the Tongliang area, Chongqing and its geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(6): 649 – 658.
- [27] 郭唯明, 王登红, 李鹏, 等. Sb – Li 组合: 罕见的矿化组合及锂的赋存状态[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1296 – 1308.
- Guo W M, Wang D H, Li P, et al. Sb – Li assemblages: Rare assemblages of mineralization and the occurrence of lithium[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1296 – 1308.
- [28] 赵芝, 王登红, 刘善宝, 等. 四川牦牛坪外围氟碳铈矿 – 萤石 – 重晶石 – 方解石脉型稀土矿的发现及其意义[J]. *中国地质调查*, 2023.
- Zhao Z, Wang D H, Liu S B, et al. Discovery of the bastnaesite – fluorite – barite – calcite type REE ore in the periphery of the Maoniuping deposit, Sichuan Province and its significance China[J]. *Geological Survey of China*, 2023.

Review on the progress of prospecting for three types of rare mineral resources in China and suggestions for the new round of prospecting

WANG Denghong, LIU Shanbao, WANG Chenghui, YU Yang, ZHAO Zhi, DAI Hongzhang
(MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Three types of rare mineral resources include rare earth, rare metal and rare – scattered mineral resources, and their safe supply is relevant to the development and growth of strategic emerging industries of China. In recent years, China has made a series of new progress in prospecting for the three types of rare mineral resources. For example, the project team of the authors made the following progress in 2023. Firstly, a number of high grade and large – thickness veins of bastnaesite – fluorite – barite – calcite have been discovered in the

periphery of Maoniuping ultra – large deposit in Mianning of Sichuan Province. Secondly, the ore bodies containing spodumene pegmatite have been drilled in the periphery of Jiada large deposit in Sichuan Province. These new discoveries will provide resource assurance for the development of strategic emerging industries of China. However, key rare metals such as lithium, niobium and tantalum are still relied on import in China. At present, numerous theoretical problems still exist in the investigation and research of the three types of rare mineral resources in China (such as genesis of the key typical deposits, spatial distribution of three types of rare mineral resources, etc.), and many bottlenecks are present in related technical areas, such as the detection technology, co – associated resources mining, beneficiation and smelting technology. In order to improve the comprehensive development and utilization of the three types of rare mineral resources and achieve results in the implementation of the new round of prospecting breakthrough strategy, the authors suggest strengthening the comprehensive study on the state of occurrence, industrial and genetic types, metallogenic models and exploration models of the three types of rare mineral resources.

Keywords: three types of rare mineral resources; prospecting progress; prospecting proposal; a new round of prospecting breakthrough strategy

(责任编辑: 刁淑娟, 魏昊明)